

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 20 日現在

機関番号：82108

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2013

課題番号：23656580

研究課題名(和文) 準安定原子線を用いた高感度脱離反応計測

研究課題名(英文) High-sensitivity reactive desorption measurement by means of metastable atom beams

研究代表者

山内 泰 (Yamauchi, Yasushi)

独立行政法人物質・材料研究機構・先端の共通技術部門極限計測ユニット・グループリーダー

研究者番号：80354356

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円、(間接経費) 900,000円

研究成果の概要(和文)：将来のエネルギー源であるプラズマ核融合炉技術において、燃料の水素の炉内分布あるいは摩耗しにくい炉の特性を確保するには、炉壁表面で起きる反応の解明が重要である。なかでも、反応生成物あるいは吸着種の高感度同定が不可欠であることから、吸着種の脱離計測を高感度で行うために、準安定原子線をパルス化する技術を研究・開発した。まず、長寿命の励起状態にある準安定原子線を放電により高強度で発生する技術、原子線強度を保つために中空円筒状にN/S極を3組配置した6極磁子を用いる技術を開発した。さらに、原子線をパルス化する、音叉を使った機械的な原子線断続技術を確認した。

研究成果の概要(英文)：Through the technological development of fusion reactors as the future energy resources, it is quite important to elucidate the reactions taking place on the reactor wall surfaces which lead to the inventory of hydrogen fuel in reactors or ensure the corrosion resistant characteristics of reactors. Since the high-sensitivity identification of the reaction products or the adsorbed species is indispensable for the research, we developed technologies for pulsing the metastable atom beams which enabled the high-sensitivity desorption measurement of adsorbates. Firstly, the technology to generate a beam of metastable atoms in their long-lived excited states was developed and then a hexapole magnet consisting of three pairs of N/S magnets cylindrically around an open bore was introduced to deliver the beam keeping at its high intensity. Lastly, a mechanical chopping system using tuning fork choppers was established for forming a pulsed beam of metastable atoms.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・核融合学

キーワード：プラズマ・壁相互作用

1. 研究開始当初の背景

D-T核融合の燃料を核融合炉自身で製造することは、核融合炉燃料サイクルの基幹技術であり、3重水素の効率的な収集を制御するためにブリーダー材料であるLiセラミクス粒の表面での3重水素放出挙動あるいは、吸着の形態を明らかにすることは重要である。また、核融合炉内部のプラズマ対向材料などの炉壁材での3重水素のインベントリーや材料自身の化学スパッタリングなどに吸着脱離挙動がかかわっており、表面の吸着種を明らかにする脱離計測は極限環境材料の重要な材料計測技術である。特に表面最外層に吸着している分子に関する知見が、表面反応律速の解明には不可欠である。

脱離計測は、積層過程や表面反応にかかわる吸着エネルギー、吸着位置、吸着結合等の評価に欠かせない計測法であり、様々な方式のもの(昇温脱離法(TDS)、電子刺激脱離(ESD)、光刺激脱離(PSD)等)が広く用いられている。しかしながら、温度、電子線や光による刺激では、表面層あるいは試料全体を刺激することになる。従って、表面吸着を議論するには、検出されたものが表面から脱離したものであるかどうかの吟味が必要であり、そのための工夫が凝らされてきた。それでもなお、最外層以外の深い原子層からの脱離の寄与が議論されている。これに対して熱エネルギーレベルの低速準安定原子線は、表面から真空側で反射されてしまうため、最外層の原子を選択的に刺激できる理想的なプローブに成り得る。分子原子に対して電離作用を持つ低速準安定原子線に最外層の吸着子を脱離させる能力があることは、当機構の研究によってその確証が示された。しかしながら、検出信号強度が充分でないことも同時に明らかとなっており、実用的計測法として確立するには、信号強度の増大あるいは信号の効率的な利用を図る技術開発が必須である。

また、低速準安定原子線は脱離計測への利用以外にも核融合プラズマそのものの計測プローブ技術としても注目される。パルス励起中性粒子線とシュタルク遷移レーザー誘起蛍光法を組み合わせたプラズマ診断法は、ステラレーター周辺プラズマや慣性静電閉じこめプラズマの電場を計測するための手法として研究が進められており、パルス励起中性粒子線は、プラズマ診断においても将来の技術革新につながる高いポテンシャルを有している。

2. 研究の目的

水素インベントリーや化学スパッタリングなどプラズマ対向材料の優れたプラズマ耐性を確保するには最表面で生ずる化学反応の解明が重要であり、反応生成物あるいは吸着種の高感度同定が不可欠である。そこで、吸着種の脱離計測を極めて高感度で行うための、低速準安定原子線を用いた技術を開発

する。低速準安定原子線は、表面から真空側で反射されてしまうことから、最外層の原子を選択的に刺激できる理想的なプローブである。準安定原子線照射による脱離信号強度および信号利用効率両面での飛躍的な向上を図るとともに、脱離現象に深くかかわる材料表面最外層の電子状態の計測と合わせて、反応計測技術の新たな展開を目指す。

3. 研究の方法

準安定ヘリウム原子線パルスビーム化することによって脱離信号をパルスとし、飛行時間計測技術の導入とパルス化した脱離信号の高効率かつ精密な検出によって材料の最外層の吸着種を解析する反応計測法を確立し、水素分離膜最表面など表面化学の解析に適用してその可能性を追求する。放電試験用真空槽にカソードを内蔵する絶縁体ノズルと陽極を兼ねるスキマーとで構成される原子線源を構築し、カソードとスキマー間の放電をパルス電圧の印加によってパルス化する方法を開発する。同時に6極磁子による速度分離法も検討する。パルス巾の短縮方法として、機械式チョッパーを導入する。

ノズル・スキマー放電式原子線源の放電をパルス化することによってパルス準安定励起原子線を生成する。放電試験用真空槽にカソードを内蔵する絶縁体ノズルと陽極を兼ねるスキマーとで構成される原子線源を構築し、ヘリウムガスの導入と大容量真空排気ポンプによる排気を行いながら、カソードとスキマー間の放電をパルス電圧の印加によってパルス化し、得られる準安定原子線の特徴を明らかにする。パルス放電の安定化の方法を検討する。

準安定原子線は、電氣的に中性であり、荷電粒子ビームに有効な静電レンズや電磁レンズによる収束ができない。ところが準安定原子の内3重項He準安定原子のように原子内に有限のスピンの持つものは、軸対象不斉磁界によって収束することができる。軸対象不斉磁界として6極磁子を用いたコリメーション効果を調べる。新たに6極磁子を導入して放電試験用真空槽に設置し、連続ビームによる収束特性評価を行う。

6極磁子を透過し、試料位置に収束する3重項He準安定原子は、その収束特性に強い速度依存性を示す。これを逆に利用して、適切なスリット配置を採ることにより、透過ビームの運動速度巾を狭めることができる。パルスビームを入射させて飛行時間分布の違いを詳細に調べることにより、6極磁子と原子源、試料位置、スリット位置の最適配置を実験的に求める。ただし、パルス巾の大幅な削減は、シングルパスの光学系では望めない。そこで、さらなるパルス巾の短縮方法として、機械式チョッパーを導入する。

4. 研究成果

放電試験用真空槽にカソードを内蔵する

絶縁体ノズルと陽極を兼ねるスキマーとで構成される原子線源を構築し、ヘリウムガスの導入と大容量真空排気ポンプによる排気を行いながら、カソードとスキマー間の放電をパルス電圧の印加によってパルス化し、得られる準安定原子線の特性を解析し、パルス放電の安定化を図った。

陰極を内蔵した絶縁性ノズルとスキマー間で放電させることにより、準安定ヘリウム原子線が大きな強度で得られる。ノズル・スキマー放電法においてノズル内の陰極に針状電極が用いられるのは、針状電極先端に電界を集中させ、放電開始を容易にするためである。放電中のノズルでは、針状陰極の先端部から白く強い光を放つプラズマが、細く糸状に伸び、ノズル開口部まで達しているのが観測された。ところがこの針状陰極の表面積が小さいことが逆に動作範囲に限界を与え、大強度を得るための大電流駆動を困難にしているものと考えられる。そうであれば、放電の安定化と大電流化を図るために、陰極を表面積の小さい針状電極から面積の大きい電極に変更することが考えられる。ただし、ノズル・スキマー放電では $100\mu\text{m}$ オーダーのノズル開口部を通してプラズマが分布し、開口部での放電電流密度は $100\text{A}/\text{cm}^2$ に達する。この高密度の放電を広い面積の電極で受けるには、中心部の放電電流密度が大きい中空陰極が適している。そこで、針状陰極のような電界集中による放電開始電圧の低減が望めない点も考慮しながら、ノズル・スキマー放電準安定原子線源の絶縁性ノズルに中空陰極を内蔵させた。

試作した原子線源の絶縁性ノズルは、耐熱性を考慮して石英ガラスとし、管のサイズは直径 20mm と大型のものである。ノズルの半球状の先端部に 0.5mm の開口を超音波加工により設けた。中空陰極には、耐熱性と熱伝導および加工の容易さから直径 10mm の Ta 管を用いた。この中空陰極をノズル内先端部の球面壁に接するように設置し、ノズル開口部に集中したプラズマが放射状に拡散しながら中空陰極内部の壁面に到達する配置とした。中空陰極前端部に密度の高いプラズマが接すると中空陰極のスパッタリングによる損耗が大きくなるため、このようにスパッタリングを低減する配置を採用した。スキマーは、ステンレス製で開口部の直径を 0.7mm とした。このスキマーから 7mm の間隔をとってノズルを配置した。ノズル・スキマー放電の放電開始電圧を下げ、安定にパルス放電させるために、ノズルとスキマーの間に直径 2mm の開口を設けたトリガ電極を取り付けた。

$1\mu\text{F}$ のコンデンサーを 3kV の定電流電源に抵抗を介して接続し、そのコンデンサーから半導体スイッチと $2\text{k}\Omega$ の抵抗を介して中空陰極に放電電圧を供給した。トリガ電極は、抵抗を介して接地した。パルス放電中の電圧は、実質的にコンデンサーから供給され、時定数 2msec で減少することになるが、放電パ

ルス巾を $100\mu\text{sec}$ 程度にすれば、電圧の減少は 5% 程度にとどまり、放電に大きく影響しないと考えられる。

パルス放電中の放電電流は、陰極に直列につながる抵抗で安定化した。この抵抗による放電電流の安定化は、精密ではないが高速であるため、短いパルス巾 $\sim 100\mu\text{sec}$ に比べても速く応答できる。パルス電流の平均値は、コンデンサーに充電する定電流電源の定電流動作によって、パルス巾 $\sim 100\mu\text{sec}$ よりも遅い応答時間ではあるが精密に制御される。

ノズルを設置した真空槽は $800\text{l}/\text{sec}$ のターボ分子ポンプで、中間排気槽は $300\text{l}/\text{sec}$ のターボ分子ポンプで排気した。中間排気槽につづけて準安定原子線ビーム計測用の小型チャンバーを取り付け $60\text{l}/\text{sec}$ のターボ分子ポンプで排気した。中間排気槽の直径 0.2mm の開口を通過したビームは、計測チャンバー内の標的ステンレス板に衝突する。途中、荷電粒子や Rydberg 原子を取り除くために中間排気槽に偏向電極を設けた。この標的に流れる全電流を測定するとともに、標的から飛び出した 2 次電子の一部を二次電子増倍管に入射させてビームの TOF 計測を行った。

パルス巾 $20\sim 100\mu\text{sec}$ 、繰り返し時間間隔 $0.4\sim 5\text{msec}$ を超える範囲で安定した動作が得られた。TOF スペクトルのチャンネル 0 付近には、放電で発生した紫外光が放電中に標的に到達したことに対応したピークあり、そのピークの形は放電の強さ、この場合はパルス放電電流の波形をほぼ反映したものであった。チャンネル 50 以降になだらかなピークがあり、準安定ヘリウム原子に対応したものであった。運動エネルギー分布の中心は、動作条件によって $70\sim 110\text{meV}$ に変化し、分布の半値巾も $70\sim 130\text{meV}$ と変わった。パルス放電電流は、平均放電電流のパルスデューティー比倍であり、デューティー比によって $0.2\sim 1\text{A}$ と変わった。 $20\mu\text{s}/0.4\text{ms}$ と $50\mu\text{s}/1\text{ms}$ のスペクトルでは、パルス電流が同じではあるが、ピーク位置が多少ずれた。これはパルス巾が異なるために生じたものであり、パルスの中心時刻のずれ $15\mu\text{s}$ にほぼ一致した。パルス巾 $50\mu\text{s}$ の 3 つのスペクトルでは、ピーク位置/半値巾ともに $70/70$ 、 $90/80$ 、 $110/130\text{meV}$ と大きくなった。これはパルス電流が 0.2 、 0.4 、 1A と大きくなるにつれ、ノズル開口部付近のプラズマ温度の上昇や、電子電流密度の上昇によって電子の衝突によるヘリウム原子の前方への散乱・加速が大きくなるためだと考えられる。

連続放電とパルス巾 $100\mu\text{s}$ 繰り返し時間 2ms でのパルス放電のそれぞれの場合に計測チャンバーの標的に流れる全電流と放電電流を調べた。連続放電では、放電電流の増加に対してビーム強度が線形よりも多少低い伸びを示した。パルス放電では直線的に増加し、放電電流 50mA 以上でもビーム強度が増加するものと思われる。連続放電に比べてパルス放電のビーム電流が $1/5$ 程度になってい

るが、パルスのデューティー比 1/20 を考慮した、連続ビーム換算強度ではパルス放電が 4 倍程度の強度となった。

磁束が発散しその密度が変化する不斉磁界では、磁気モーメントに対して偶力以外に並進力も働く。これを利用したのが、Stern-Gerlach の実験であり、Rabi の核スピン研究である。この並進力が円筒対称に働くように軸対称不斉磁界を形成すればレンズとして使うことができる。この並進力は、原子核でもその周りの電子系でも磁気モーメントさえあれば働くが、電子系の磁気モーメントが核磁気モーメントより遙かに大きいので(ボア磁子は核磁子の約 1800 倍)、電子系の全磁気モーメントが零でない原子の方が曲がり易い。好都合なことに、 $\text{He}(2^3S_1)$ は、電子系に磁気モーメントを持っているため軸対称不斉磁界で比較的容易に収束できる。我々は、3 回対称の軸対称不斉磁界をもつ 6 極磁子を用いた。中心軸に沿って貫通孔が開いている円筒形の永久磁石を、軸に垂直方向かつ軸周りに 120 度毎に NS 極の対が現れるように磁化した。3 回の軸対称性を満たすように分布する磁束密度の絶対値 $|B|$ は、中心軸からの距離 r の 2 次関数 $|B| = B_0(r/r_0)^2$ と表される。ただし、 B_0 は貫通孔内壁での磁束密度、 r_0 は貫通孔の半径である。従って、貫通孔内では磁気モーメントのみを持つ粒子に働く力は、 r に比例して中心軸に垂直に働く力だけであり、その向きの運動は、固有振動数 $\omega = (2\mu B_0/m)^{1/2}/r_0$ の調和振動になる。ただし、 μ はボア磁子、 m は He の質量である。このことから、貫通孔内の 1 点から放たれて軸方向に同じ速度で飛行する全ての粒子は、時間が $2\pi/\omega$ 経過した後、再び 1 点に収束することは明らかである。ところが実際の装置では、原子線源を 6 極磁子の外に置かざるを得ず、原子線を照射する試料はさらに離れる。このように理想的な条件からはずれた場合でも収束効果がどの程度あるかは自明ではない。実際の装置の配置と寸法に基づいて軌道シミュレーションを行った。原子線源から 50mm 直線飛行して 6 極磁子の貫通孔に入り、正弦曲線の一部を描きながら 180mm 飛行して自由空間へ出る。その後、再び直線飛行して原子線源から 700mm 離れた点に収束する。ただし、6 極磁子内の磁場分布が軸方向に一定と仮定し、端面効果も考慮していない。また、軸方向に同じ速度で飛行する軌道のみを考慮した。このように単純化したシミュレーションではあるが、6 極磁子による収束特性の大筋をつかむには充分であった。まず、原子線源が 6 極磁子から離れていても収束することが分かった。放出点が軸からはずれていると収束点も軸をはずれ、軸はずれ量からみて結像倍率が 4 倍強であった。また、6 極磁子の受容角は半角の正接値で約 1.8/50、立体角で 4×10^{-3} sr である。700mm 地点で 10mm の試料を見込む立体角が 5×10^{-5} sr であることから 2 桁程度の高密度

化が期待された。

3 重項状態の内、6 極磁子が収束するのは、貫通孔内の磁場と $\text{He}(2^3S_1)$ の磁気モーメントの向きが反平行 ($S_z = 1$) でポテンシャルエネルギーが磁場の強い内壁側で高く、中心軸の方向に押し戻す力を受ける場合である。平行 ($S_z = -1$) の場合は、逆に内壁方向の力を受け、強く発散してしまう。 $S_z = 0$ の状態にある $\text{He}(2^3S_1)$ は、力を受けず直進する。従って、 $S_z = 0, -1$ の $\text{He}(2^3S_1)$ を軸上に置いた絞りで取り除けば、 $S_z = 1$ だけの $\text{He}(2^3S_1)$ を得ることができる。つまり、軸上絞りを置くことによって集束と同時にスピン偏極も行えるのである。残念ながら、 $S_z = 1$ の $\text{He}(2^3S_1)$ も一部取り除かれるが、その割合は、2mm の絞りの場合、受容立体角の 10% に満たない。

原子線源を 100 μs のパルス巾でパルス放電させながら 6 極磁子を通して試料位置に置いた 1mm の開口の中に飛び込んだ粒子を 2 次電子増倍管で検出し、ビームの飛行時間分布を得た。放電パルスの立ち上がりを経験の原点とし、軸上絞りを置かない場合には、0 ~ 100 μs にパルス駆動特有の強い放電発光によるピークとやや遅れて 300 ~ 600 μs に低速 He^* 原子線のピークが観測された。軸上絞りを挿入するとア) 放電光のピークがほとんど無くなり、イ) 低速 He^* 原子線のピークが多少小さくなるとともにウ) 高速側 (200 ~ 300 μs) の裾が消失した。これらの挙動は、それぞれ、ア) 放電発光や イ) 低速の $\text{He}(2^1S_0)$ と $S_z = 0, -1$ の $\text{He}(2^3S_1)$ および ウ) 高速の He^* の直進成分が軸上絞りによって取り除かれたことを示している。一方、空間的な収束の様子は、試料位置に置いた 1mm の開口を 2 次元走査して得た計数分布から調べた。計数のゲート時刻を 300 ~ 600 μs の $S_z = 1$ の $\text{He}(2^3S_1)$ および、0 ~ 100 μs の放電発光に合わせた。 $\text{He}(2^3S_1)$ が半値巾 2mm 強のスポットに収束した。この半値巾と軌道シミュレーションで拡大率が 4 倍強とされたことを勘案すると、実質的な原子源サイズが 0.5mm 程度と見積もられる。原子源のスキマーの開口径 0.7mm に近い値である。軸上絞りの丸い影がその支持棒の影と共に明瞭に観察された。2mm の絞りの本影が 5mm にまで小さくなっており、集束した $\text{He}(2^3S_1)$ のスポットがそっくり本影の中に収まった。さらに、DC 放電の場合には、パルス放電の場合に較べて $\text{He}(2^3S_1)$ の強度がかなり大きく、かつ放電発光の割合が格段に小さい。DC モードでの $\text{He}(2^3S_1)$ の集束スポットのピークの試料電流密度は 600 nA/cm² を越え、前年度の集束しないシステムと比較して約 100 倍向上し、6 極磁子を用いたコリメーション効果を確認した。

このように、ノズル・スキマー放電をパルス化して高密度の準安定 He 原子線を得ることができたが、ノズルにカソードを内蔵した構造で放電を維持するにはガス圧を高くできないため、ビームは断熱膨張による超音速

ビームよりも拡散ビームに近い性質を持ち、なおかつ放電プラズマ中の電子との衝突により運動量をランダムに受けるため速度分布がかなり広く v/v_0 が 1 に近い。そのため、ビームをノズル・スキマー放電で一旦パルス形成しても、試料までの飛行時間 t に応じて、時間軸でのパルス巾が t に広がるのが課題である。試料上でのパルス巾を狭くするには、飛行時間（飛行距離）を短くするかあるいは速度分布を鋭く（ v/v_0 の値を大きく）する必要がある。飛行距離は、チョッパーを試料直近に配置することで短くすることが可能である。

従来から原子・分子線実験では、回転チョッパーが用いられてきた。しかしながら、真空中で円板をモーターで回転させる方式のチョッパーは、全体のサイズを小型化するのが難しく、試料の直近に設置するのが難しい。また、モーターの回転軸の軸受けを潤滑するグリースなどからの脱ガスによる真空劣化あるいは試料表面の汚染の問題もある。これに対して音叉チョッパーを用いれば小型化ならびに清浄な真空環境が実現できる。

音叉型チョッパーには、Electro Optical Products Corporation 社製の音叉 CH10 (65mm x 25mm x 18mm) を採用した。三個の中空コイルで磁極を取り付けた磁性ステンレス製音叉を励振する構成である。部品は全て超高真空対応で 120 度 C のベイクングが可能であり、共振の中心周波数は 300Hz であった。音叉の両腕にチョッパー板 7x10mm を付け、無振動時に閉じた状態にした。発振回路から 300Hz の交流電流を印加すると、ほぼ半周期の間、チョッパー板が閉じ、残りの半周期は正弦波に応じて平行な開口が開く。従って、単一の音叉では、デューティー比 1 : 1 のチョッピングができるが、TOF で必要な小さなデューティー比のチョッピングができない。そこで、CH10 を 2 式組み合わせることでデューティー比の小さな短いパルスを生成した。一方のチョッパーが閉まりかけるタイミングでもう一方のチョッパーを開けることにより、チョッパーが、実効的に開いている時間を短くできる。

2 連音叉チョッパーによる短パルスの発生には、2 つのチョッパーの駆動周波数を厳密に一致させた上で、互いの位相を精密にずらす必要がある。そのために、位相同期回路を用いた駆動電源で 2 つの音叉チョッパーを動作させた。まず、主発信器で周波数を 300Hz に固定した正弦波を発振させた。その正弦波の一部を取り出して移相器を通し、周波数は厳密に同じであるが位相を任意にずらした参照正弦波を得た。ついで、周波数を電圧で制御可能な副発信器で 300Hz 近傍の正弦波を発振させその一部を取り出して、位相検波器で参照正弦波との位相比較を行った。位相のズレに応じた電圧を位相検波器から副発信器に負帰還することで副発信器の発振正弦波の周波数と位相を参照正弦波に正確に一致させた。この主発信器と副発信器からの正

弦波を電力増幅して 2 つの音叉チョッパーのコイルに供給した。

2 連チョッパーの短パルスビーム生成の性能試験はレーザー光を用いて行った。赤色半導体レーザーのビームをナイフエッジスリットで 50 μ m 以下のシート状にして 2 連チョッパーの中心軸に沿って入射し、透過したビームをフォトダイオードで検出した。チョッピング挙動をシンクロスコープで記録した。位相シフトが 144 度ではパルス巾 300 μ s の台形パルス、位相シフト 168 度でパルス巾 100 μ s の台形パルスが得られた。台形のスロープは片側 20 μ s 程度あり、位相シフト 177 度でパルス巾 20 μ s の三角パルスとなった。さらに位相シフトを 180 度に近づけていくとパルス巾が小さくなると同時にパルス強度も減少したが、パルス巾 5 μ s 以下のパルス波形も観測でき、音叉チョッパーによる低速準安定 He 原子線パルス化の実効性が確かめられた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 20 件)

山内泰, グラフェンの電子スピン状態解明, パリティー, 査読無, 29 (2014) 32-33

M. Kurahashi, Y. Yamauchi, Fully Alignment-Specified O₂ Chemisorption on Vicinal Si(100), J. Chem. Phys., 査読有, 140 (2014) 031102-1 DOI:10.1063/1.4862055

X. Sun, S. D. Li, B. Wang, M. Kurahashi, P. Andrew, Y. Yamauchi, Significant variation of surface spin polarization through group IV atom (C Si Ge Sn) adsorption on Fe₃O₄(100), Phys. Chem. Chem. Phys., 査読有, 16 (2014) 95-102 DOI: 10.1039/c3cp53272k

H. Kuwahara, Y. Yamauchi, P. Andrew, Spin Behavior in a Quarter Rotation of the Magnetic Field, J. Korean Phys. Soc., 査読有, 62 (2013) 1286-1290 DOI:10.3938/jkps.62.1286

X. Sun, S. Entani, Y. Yamauchi, A. Pratt, M. Kurahashi, Spin polarization study of graphene on the Ni(111) surface by density functional theory calculations with a semiempirical long-range dispersion correction, J. Appl. Phys., 査読有, 114[14] (2013) 143713-1 DOI:10.1063/1.4824186

M. Kurahashi, Y. Yamauchi, Steric effect in O₂ sticking on Al(111): preference for parallel geometry, Phys. Rev. Lett., 査読有, 110 (2013) 246102-1 DOI: 10.1103/PhysRevLett.110.246102

E. Shiro, M. Kurahashi, X. Sun, Y. Yamauchi, Spin polarization of single-layer graphene epitaxially grown on Ni(111) thin film, Carbon, 査読有, 61 (2013) 134-139 DOI: 10.1016/j.carbon.2013.04.077

M. Kurahashi, X. Sun, Y. Yamauchi, Magnetic properties of O₂ adsorbed on

Cu(100): A spin-polarized metastable He beam study, *Physical Review B*, 査読有, 86 (2012) 245421-1-6 DOI:10.1103/PhysRevB.86.245421

Yasuhiro YAMAUCHI, FUKUI, HONDA, OKAFUJI, SAKAI, Yasushi YAMAUCHI, Effect of Impurity in Discharge Gas on High γ Properties of Newly Developed CeSrO Films for Novel Plasma Display Panel, *IEICE Transactions on Electronics*, 査読有, E955-C (2012) 1761-1768.

X. Sun, B. Wang, Y. Yamauchi, Electronic Structure and Spin Polarization of Metal (Mn Fe Cu) Phthalocyanines on an Fe(100) Surface by First-Principles Calculations, *Journal of Physical Chemistry C*, 査読有, 116 (2012) 18752-18758 DOI:10.1021/jp304361n

X. Sun, B. Wang, Y. Yamauchi, Spin Splitting in a Nickel Phthalocyanine Molecule on an Fe(100) Surface by First-principles Calculations, *Journal of Physical Chemistry C*, 査読有, 116 (2012) 10976-10981 DOI:10.1021/jp300315e

A. Pratt, M. Kurahashi, X. Sun, D. Gilks, Y. Yamauchi, Direct observation of a positive spin polarization at the (111) surface of magnetite, *Physical Review B*, 査読有, 85 (2012) 180409-1-4 DOI:10.1103/PhysRevB.85.180409

K. Yoshino, Y. Morita, Nagatomi, Terauchi Masaharu, Tsujita Takuji, Doi Yoshihiro, Nakayama Takahito, Y. Yamauchi, Changes in Ionization Potentials of MgO and CaO Films upon Heating in Air and Vacuum Investigated by Metastable De-excitation Spectroscopy, *Applied Surface Science*, 査読有, 259 (2012) 135-141 DOI:10.1016/j.apsusc.2012.07.005

M. Kurahashi, Y. Yamauchi, Huge steric effects in surface oxidation of Si(100), *PHYSICAL REVIEW B*, 査読有, 85 (2012) 1613021-1613024 DOI:10.1103/PhysRevB.85.161302

X. Sun, Y. Yamauchi, The Geometric and Electronic Structure of Xe-adsorbed Fe(001) Surface by First-Principles Calculations, *CHEMICAL PHYSICS LETTERS*, 査読有, 512 (2012) 99-103 DOI:10.1016/j.cplett.2011.07.026

A. Pratt, L. Dunne, X. Sun, M. Kurahashi, Y. Yamauchi, Energy-level alignment at the Alq3/Fe3O4(001) interface, *JOURNAL OF APPLIED PHYSICS*, 査読有, 111 (2012) 07C1141-07C1143 DOI:10.1063/1.3677768

M. Kurahashi, A. Pratt, Y. Yamauchi, Spin polarization of the Si(111)-7x7 surface: A study with a spin-polarized metastable helium atom beam, *SURFACE*

SCIENCE, 査読有, 605 (2011) 612-615 DOI:10.1016/j.susc.2010.12.027

Xia SUN, YAMAUCHI Yasushi, First-principles calculations of Xe-adsorbed Pd(111) and Cu(111) surfaces with an empirical correction of van der Waals interactions, *JOURNAL OF APPLIED PHYSICS*, 査読有, 110 (2011) 1037011-1037016 DOI:10.1063/1.3660425

Xia SUN, YAMAUCHI Yasushi, Adsorbate-induced spin-polarization enhancement of Fe3O4(001), *JOURNAL OF PHYSICS D-APPLIED PHYSICS*, 査読有, 44 (2011) 0640101-0640105 DOI:10.1088/0022-3727/44/6/064010

SUZUKI Taku, YAMAUCHI Yasushi, HISHITA Shunichi, Spin dependent low energy He+ ion scattering on non-magnetic surfaces, *PHYSICAL REVIEW LETTERS*, 査読有, 107 (2011) 1761011-1761015 DOI:10.1103/PhysRevLett.107.176101

〔学会発表〕(計 2件)

山内泰, 倉橋光紀, 鈴木拓, 低速準安定ヘリウム原子のパルスビーム技術開発, プラズマ・核融合学会第28回年会, 2011/11/23, 金沢

山内泰, 倉橋光紀, 鈴木拓, 低速準安定ヘリウム原子線のパルス化, 72回応用物理学学会学術講演会, 2011/09/1, 山形

〔産業財産権〕

出願状況(計 1件)

名称: オゾンビーム発生装置

発明者: 山内泰/プラッタンドリユー/倉橋光紀

権利者: 独立行政法人物質材料研究機構

種類: 特許

番号: 特願 2012-132445

出願年月日: 2012年06月12日

国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山内 泰 (Yamauchi Yasushi)

独立行政法人物質材料研究機構、先端的共通技術部門極限計測ユニット、グループリーダー

研究者番号: 80354356